

УРАВНОВЕШИВАНИЕ ТРЕХЦИЛИНДРОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ ДЕЙСТВИЯ РЕАКТИВНОГО КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА

к.т.н. Гусаров В.В., к.т.н. Ашишин А.А.

Московский политехнический университет

a.a.ashishin@mospolytech.ru

Улучшение уравновешенности поршневых двигателей внутреннего сгорания – важная задача совершенствования конструкции, решение которой позволяет улучшить экологические свойства автомобиля за счет снижения вибрации и шумов.

Возмущения от действия опрокидывающего (реактивного крутящего) момента существенно отличаются от действия инерционных сил и моментов. Их общепринятая количественная оценка в существующих методах анализа отсутствует, что затрудняет общий анализ уравновешенности.

Авторы предложили использовать в качестве единой для всех источников неуравновешенности меры возмущений величину максимального за период действия импульса, разработали программный комплекс, позволяющий выполнять такую оценку неуравновешенности для трехцилиндрового поршневого двигателя типа L3 с заданными массогабаритными характеристиками и режимами работы.

Предложен механизм для частичного уравновешивания реактивного крутящего момента такого двигателя, найдены его оптимальные параметры для поля заданных режимов работы. С использованием разработанного комплекса выполнена аналитическая количественная оценка неуравновешенности от действия опрокидывающего момента у трехцилиндрового двигателя с типичными массогабаритными параметрами, как при уравновешивании предложенным способом, так и без него. Для типичной схемы частичного уравновешивания момента от сил инерции 1-го порядка в рассмотренном двигателе выполнены оценки возмущений и от их действия на разных режимах работы.

Найдено, что в двигателе типа L3 неуравновешенность от действия реактивного крутящего момента на малых и средних частотах вращения вносит основной вклад в виброактивность двигателя, превосходящий по значениям импульсов вклад от остаточной неуравновешенности от действия момента инерции 1-го порядка, присущий типичным конструкциям. Рассмотренный механизм позволяет уменьшить эту неуравновешенность в несколько раз.

Ключевые слова: трехцилиндровый двигатель, уравновешивание двигателя, опрокидывающий момент, крутящий момент двигателя, механизм уравновешивания, оптимизация уравновешивания, количественная оценка уравновешенности, импульс возмущения.

Введение

Общая неуравновешенность силового агрегата (СА) автомобиля от работающего двигателя определяется в основном возмущениями от неуравновешенных сил и моментов инерции и реакций от действия крутящего момента – реактивного крутящего момента (РКМ). Обычно для анализа неуравновешенных сил и моментов инерции их суммируют от отдельных цилиндров и оценку уравновешенности ДВС выполняют по следующим параметрам [1]:

$$1) \sum P_{j1}; 2) \sum P_{j2}; 3) \sum P_c; \\ 4) \sum M_{j1}; 5) \sum M_{j2}; 6) \sum M_c,$$

где $\sum P_{j1}$ – сумма сил инерции 1-го порядка от возвратно-поступательно движущихся масс

(ВПДМ) кривошипно-шатунного механизма (КШМ) двигателя; $\sum P_{j2}$ – то же для сил инерции 2-го порядка; $\sum P_c$ – то же для центробежных сил; $\sum M_{j1}$, $\sum M_{j2}$, $\sum M_c$ – суммарные моменты от этих сил.

Эти возмущения носят гармонический характер и сравнительную количественную оценку можно выполнять по данным их амплитуд.

Возмущающее действие РКМ определяется характером изменения результирующего крутящего момента M_k по углу поворота коленчатого вала ϕ : $M_k = f(\phi)$ ДВС на последней коренной шейке и определяется числом цилиндров i , схемой коленчатого вала, последовательностью рабочих ходов, размерами и массами элементов кривошипов, режимом работы.

Функция $M_k = f(\varphi)$ в отличие от инерционных сил и моментов является периодической, но не гармонической. Количественную оценку возмущений РКМ авторы предложили выполнять по величине максимального импульса возмущений $L_{M,PKM}$ за период его действия [2].

Такая оценка возмущений является универсальной, ее можно применить и для инерционных сил и моментов. Выполненные авторами расчеты [2] показали, что для подобных двигателей (с одинаковыми размерами цилиндров, схемой их расположения и ВПДМ в каждом цилиндре) с уменьшением числа цилиндров неуравновешенность от действия РКМ существенно возрастает.

Целью исследования являлась оценка эффективности механизма уравнивания РКМ трехцилиндрового ДВС, а также выполнение сравнительной количественной оценки его неуравновешенности как от действия инерционных моментов, так и от действия РКМ на разных режимах работы.

Способ уравнивания РКМ трехцилиндрового ДВС

Как показал нижеприведенный анализ у трехцилиндрового ДВС (тип L3) возмущения от РКМ достаточно велики, так что на некоторых режимах превосходят основную для такого типа ДВС неуравновешенность от действия инерционных моментов 1-го порядка ΣM_{j1} . Заметим, что если для уравнивания инерционных сил и моментов существуют достаточно отработанные способы, то специальное уравнивание возмущений от РКМ выполняют только для двух типов ДВС: рядных 2-х и 4-х цилиндровых – за счет размещения балансирных валов с определенным смещением по вертикали относительно друг друга, предназначенных главным образом для уравнивания сил инерции [3].

Теоретический анализ показывает возможность частичного уравнивания РКМ в ДВС практически любого типа за счет уравнивания главной моторной гармоникой этого момента механизмом, создающим гармонически меняющийся инерционный момент с той же частотой [4]. Такой механизм, например, может состоять из пары шестерен со специально подобранными схемами расположения и величины дисбалансов на каждой так, чтобы период гармонического момента от центробежных сил шестерен был равен периоду результирующего крутящего момента ДВС. Однако количествен-

ный анализ возможностей такого уравнивания, в частности для ДВС типа L3 в известной литературе практически отсутствует.

Один из возможных вариантов таких схем уравнивания в ДВС типа L3 показан на рис. 1. Здесь уравнивающие шестерни (поз. 1 и 2) приводятся непосредственно от коленчатого вала (поз. 3). За счет действия центробежных сил создается опрокидывающий гармонический момент $M_{ш} = f(\varphi)$, действующий в той же плоскости и с тем же периодом, как у результирующего крутящего момента двигателя $M_k = f(\varphi)$. Учитывая, что период результирующего крутящего момента в ДВС типа L3: $T = 720^\circ / i = 240^\circ$, видно, что угловая скорость вращения шестерен $\omega_{ш}$ должна быть в 1,5 раза выше угловой скорости коленчатого вала $\omega_{к.в.}$: $\omega_{ш} / \omega_{к.в.} = 1,5$. Поскольку дисбалансы уравнивающих шестерен одинаковы ($M_1 r_1 = M_2 r_2$), то радиусы векторы параллельны ($\alpha_1 = \alpha_2$), а оси симметричны относительно коленчатого вала ($x_1 = -x_2$, $y_1 = y_2$). Тогда результирующая сил в любой момент времени равна нулю ($\Sigma P_{cx} = 0$, $\Sigma P_{cy} = 0$) и от центробежных сил будет действовать только гармонический момент:

$$M_{ш} = P_{c1} \cdot \sin \alpha_1 \cdot A = M_1 r_1 \cdot \omega_{ш}^2 \sin \alpha_1 \cdot A,$$

где A – расстояние между осями уравнивающих шестерен.

В результате на опоры СА будет действовать суммарный момент $M_c = f(\varphi)$, где $M_c = M_k + M_{ш}$. Заметим, что эти шестерни с учетом вышеизложенного могут быть установлены в любом месте по длине поддрессоренной части СА при условии расположения радиусов векторов дисбалансов в плоскости перпендикулярной оси коленчатого вала.

При суммировании следует учитывать начальный угол установки дисбалансов $\alpha_{нач}$, соответствующий нулевому значению угла поворота кривошипа, когда поршень находится в верхней мертвой точке в конце такта сжатия. Неуравновешенность от действия этого суммарного момента может быть оценена по величине импульса возмущения:

$$L_{M_c} = \frac{1}{\omega} \cdot \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (M_c - M_i) \cdot d\varphi,$$

где ω – угловая скорость вращения коленчатого вала на данном режиме работы; φ_1 и φ_2 – границы интервала действия максимального за период импульса; M_i – средний индикаторный момент ДВС.

Результаты аналитической оценки возможностей уравновешивания РКМ трехцилиндрового ДВС

Задача оптимизации частичного уравновешивания РКМ заключается в определении значений дисбалансов шестерен $m_1 r_1$, $m_2 r_2$, начального угла установки дисбалансов $\alpha_{нач}$, расстояния между осями шестерен A (рис. 1), при которых обеспечивается минимальное значение импульса возмущения $L_{мс} = L_{мур}$ для заданных параметров конструкции и режима работы рассматриваемого ДВС.

Была разработана программа, позволяющая для задаваемых параметров конструкции ДВС типа L3 и режима работы находить значение импульсов возмущений от действия РКМ как без использования уравновешивающих шестерен, так и с ними. Кроме того, программным способом решалась задача оптимизации по определению параметров уравновешивающих шестерен, обеспечивающих максимально возможное снижение возмущения от действия РКМ.

Результаты анализа представлялись как в графическом виде (графики протекания мо-

ментов M_k , $M_{ш}$ и M_c за период), так и в виде численных значений импульсов возмущений: $L_{м.ПКМ}$ – значение импульса без уравновешивания (Н·м·с), $L_{мур}$ – значение импульса при оптимально подобранных параметрах дисбалансов шестерен (табл. 1).

Такой количественный анализ выполнили для ДВС типа L3 с типичными параметрами КШМ: ход поршня $S=85$ мм, диаметр цилиндра $D=85$ мм, безразмерный кинематический параметр $\lambda=0,25$, масса поршня 0,45 кг. Режим работы определялся задаваемыми значениями среднего эффективного давления p_e (МПа) и частоты вращения коленчатого вала n (об/мин). Найденные программным способом значения импульсов возмущений от действия РКМ как без уравновешивания $L_{м.ПКМ}$, так и при оптимальном для каждого режима уравновешивания $L_{мур}$ – представлены в табл. 1.

На рис. 2 показаны графики опрокидывающих моментов, действующих в плоскости перпендикулярной коленчатому валу, определяющих неуравновешенность расчетного варианта ДВС от действия РКМ на режиме работы: $p_e=1,2$ МПа, $n=2500$ мин⁻¹. Значение импульса

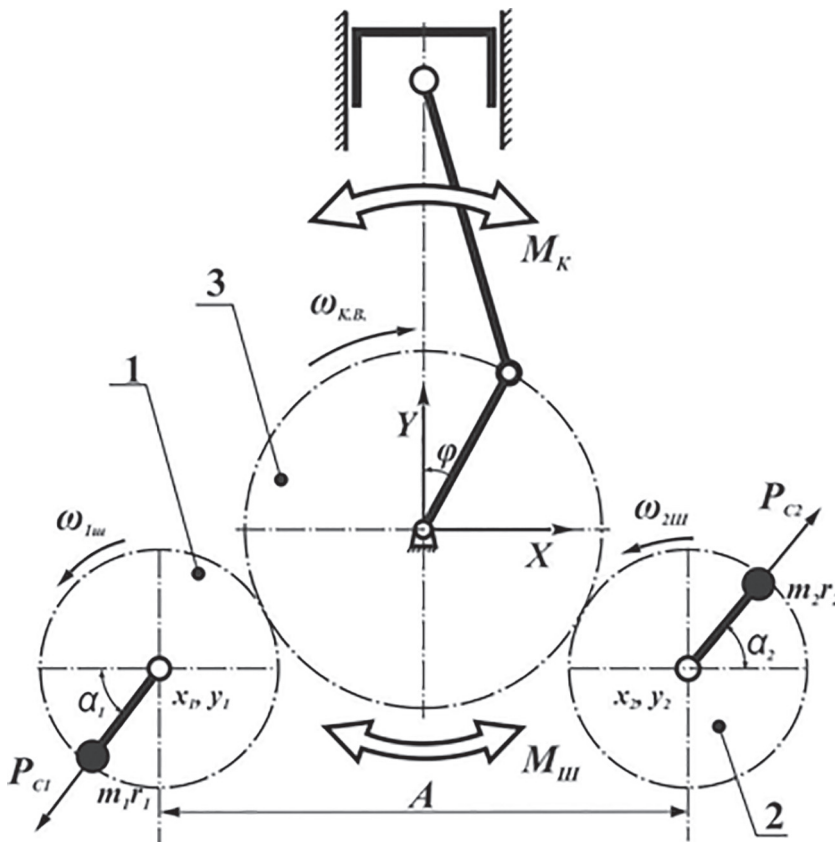


Рис. 1. Схема частичного уравновешивания РКМ с помощью шестерен с дисбалансом:

1, 2 – шестерни с определенным дисбалансом, соответственно $m_1 r_1$ и $m_2 r_2$; 3 – коленчатый вал

Таблица 1

Значения импульсов возмущения в расчетном ДВС типа L3 от действия крутящего момента без уравнивания $L_{М.РКМ}$ (Н·м·с) и при оптимальном уравнивании $L_{Мур}$ (Н·м·с) на разных режимах работы

n, мин ⁻¹	Среднее индикаторное давление P_e , МПа					
	1,2		0,9		0,6	
	$L_{М.РКМ}$	$L_{Мур}$	$L_{М.РКМ}$	$L_{Мур}$	$L_{М.РКМ}$	$L_{Мур}$
5500	0,666	0,177	0,550	0,176	0,438	0,189
4000	0,915	0,138	0,757	0,107	0,599	0,093
3000	1,221	0,242	1,009	0,190	0,798	0,137
2500	1,465	0,328	1,210	0,250	0,958	0,187
2000	1,832	0,452	1,513	0,371	1,198	0,286
1500	2,443	0,653	2,018	0,539	1,597	0,420

возмущения без уравнивания (только от действия РКМ) $L_{Мркм}=1,465$ Н·м·с, этой величине соответствует площадь, ограниченная кривой крутящего момента ДВС $M_k=f(\varphi)$ и линией среднего индикаторного момента M_i (закрашенная темно-серым цветом).

В случае уравнивания на опоры СА будет передаваться опрокидывающий момент, определяемый кривой $M_c=f(\varphi)$: результирующей от действия моментов шестерен $M_{ш}=f(\varphi)$ и от ДВС $M_k=f(\varphi)$. В этом случае импульс возмущения $L_{Мур}=0,328$ Н·м·с (этой величине соответствует площадь, закрашенная светлым цветом). Улучшение уравниваемости характеризуется уменьшением импульса возмущения в 4,5 раза. Найденные значения оптимальных параметров уравнивающих шестерен для этого случая составили: $m_1 r_1 A=1,870 \cdot 10^{-3}$ кг·м², $\alpha_{нач}=7,5^\circ$.

Из данных, представленных в табл. 1, видно, что рассмотренный способ уравни-

вания весьма эффективен: импульсы возмущения уменьшаются на некоторых режимах более чем в 5 раз, а учитывая, что энергия возмущения пропорциональна квадрату значения импульса [2], это улучшение уравниваемости еще более существенно.

Компоновка механизма уравнивания не представляет сложностей: как было показано выше, уравнивающие шестерни могут быть размещены достаточно произвольно как по длине, так и по ширине СА. Наибольшая сложность такого механизма состоит в том, что при изменении нагрузочного и особенно скоростного режимов необходимо существенно менять значение амплитуды уравнивающего момента $M_{ш}=f(\varphi)$. Например, если на режиме $p_e=1,2$ МПа, $n=2500$ мин⁻¹ оптимальные расчетные параметры уравнивающих шестерен исследованного ДВС должны соответствовать значению: $m_1 r_1 A=1,870 \cdot 10^{-3}$ кг·м², то на режиме $p_e=0,6$ МПа, $n=4000$ мин⁻¹ их оптимальная ве-

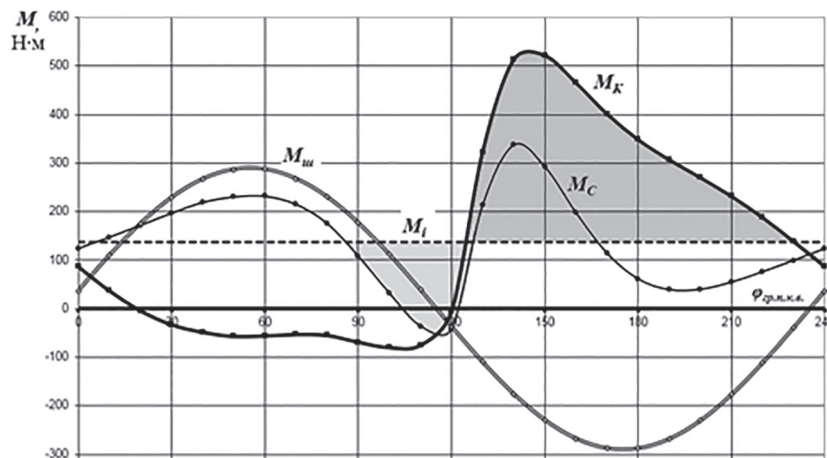


Рис. 2. Графики протекания моментов, действующих в расчетном ДВС в плоскости перпендикулярной коленчатому валу ($p_e=1,2$ МПа, $n=2500$ мин⁻¹): M_k – результирующий момент; $M_{ш}$ – момент от уравнивающих шестерен; M_c – суммарный момент; M_i – средний индикаторный момент

личина: $m_1 r_1 \cdot A = 0,417 \cdot 10^{-3}$ кг·м². Регулировка этого параметра возможна как за счет изменения дисбаланса шестерен $m_1 r_1$, так и за счет расстояния между их осями А (рис. 1).

Сравнительная оценка возмущений от действия инерционных моментов и РКМ в трехцилиндром ДВС

Сравнили неуравновешенность рассматриваемого ДВС от действия РКМ и от инерционных моментов ВПДМ КШМ. Как известно, в ДВС типа L3 неуравновешены моменты от сил инерции 1-го и 2-го порядков ΣM_{j1} и ΣM_{j2} [1]. Здесь момент ΣM_{j1} создает в несколько раз большие возмущения, поэтому практически только его уравновешивают тем или иным способом. В последнее время оптимальным признается частичное уравновешивание этого момента с помощью дисбалансов, устанавливаемых на передней и задней частях коленчатого вала. Именно такой способ уравновешивания применяют на признанном лучшим в 2012 г. двигателе такого типа Ford EcoBoost [6]. В таблице 2 приведены расчетные данные импульсов возмущения $L_{\Sigma M_{j1}}$ (Н·м·с) от действия момента ΣM_{j1} для рассматриваемого ДВС с заданными массогабаритными параметрами при вышеуказанном частичном уравновешивании на разных частотах вращения коленчатого вала.

Данные приведены без учета нагрузки, поскольку возмущения от действия инерционных сил и моментов не зависят от нее. При сравнении данных возмущений, от действия РКМ (табл. 1) и инерционного момента ΣM_{j1} (табл. 2) следует иметь в виду, что энергия возмущения (определяющая неуравновешенность СА) вычисляется по формуле [2]:

$$e = \frac{(L_{\max})^2}{J_{c.a.} \cdot 2},$$

где L_{\max} – максимальный импульс возмущений от переменного момента за период его действия, $J_{c.a.}$ – момент инерции СА относительно оси действия возмущающего момента.

РКМ действует относительно оси коленчатого вала, а неуравновешенный момент инерции ΣM_{j1} действует вдоль коленчатого вала, поэтому момент инерции в первом случае будет определяться шириной B , во втором – его длиной L . Из этого следует, что для реальных массогабаритных характеристик СА: $L/B \approx 2,5...3,5$ и с учетом того, что момент инерции в первом приближении пропорционален квадрату определяющего габаритного размера даже при одинаковых импульсах возмущений неуравновешенность от РКМ будет в несколько раз больше, чем от действия момента ΣM_{j1} . Таким образом, возмущения от РКМ весьма существенны: на малых и средних частотах вращения вала двигателя ($n \leq 3000$ мин⁻¹) они являются основным источником неуравновешенности ДВС типа L3, так что задача уравновешивания РКМ является достаточно актуальной.

Заключение

Таким образом, в результате исследований разработан программный комплекс, позволивший выполнять количественную оценку всех видов возмущений в ДВС типа L3. Показана высокая эффективность частичного уравновешивания РКМ с помощью пары шестерен со специальной схемой размещения дисбалансов на каждой, причем оптимальные параметры могут быть определены расчетным способом с учетом массогабаритных характеристик ДВС и режима работы. Найдено, что возмущения от РКМ являются основным источником неуравновешенности ДВС типа L3 на малых и средних частотах вращения коленчатого вала.

Литература

1. Луканин В.Н. Двигатели внутреннего сгорания / под ред. В.Н. Луканина, М.Г. Шатрова. – М. Высш. шк., 2005. 400 с.
2. Гусаров В.В., Ашишин А.А. Новый способ оценки внутренних возмущений поршневых автомобильных ДВС // Машиностроение и инженерное образование. 2009. № 1(18). С. 15–21.

Таблица 2

Значения импульсов возмущения $L_{\Sigma M_{j1}}$ в расчетном ДВС типа L3 от действия частично уравновешенного момента сил инерции ВПДМ 1-го порядка ΣM_{j1} на разных частотах вращения коленчатого вала

n , мин ⁻¹	1500	2000	2500	3000	4000	5500
$L_{\Sigma M_{j1}}$, Н·м·с	1,175	1,567	1,959	2,350	3,134	4,309

3. Гусаров В.В., Ашишин А.А. Новый способ анализа и расчет уравнивания двигателя типа R2 // Журнал «Известия МГИУ». Технические и естественные науки. 2006. № 4, с. 5–10.
4. Кер Вильсон У. Вибрационная техника. М., «Машиностроение», 1963. 415 с.
5. [Электронный ресурс]. URL: http://www.zr.ru/content/articles/434813-dvigatel_ecoboost_litr_na_troih/
2. Gusarov V.V., Ashishin A.A. New way to assess internal perturbations of a reciprocating automotive internal combustion engines. *Mashinostroenie i inzhenerное образование*. 2009. No 1(18), pp. 15-21 (In Russ.).
3. Gusarov V.V., Ashishin A.A. New method of analysis and calculation of balancing the R2 engine. *Zhurnal «Izvestiya MGIU». Tekhnicheskie i estestvennye nauki*. 2006. No 4, pp. 5-10 (In Russ.).
4. Ker Vil'son U. *Vibratsionnaya tekhnika* [Vibrating equipment]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1963. 415 p.
5. URL http://www.zr.ru/content/articles/434813-dvigatel_ecoboost_litr_na_troih/

References

1. Lukanin V.N. i dr. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Internal combustion engines]. Pod red. V.N. Lukanina i M.G. Shatrova. Moscow. Vyssh. shk. Publ., 2005. 400 p.

BALANCING OF THREE-CYLINDER ENGINE THROUGH THE ACTION OF REACTIVE TORQUE

Ph.D. **V.V. Gusarov**, Ph.D. **A.A. Ashishin**

Moscow Polytechnic University

a.a.ashishin@mospolytech.ru

The improvement of the balance of reciprocating internal combustion engines is an important task of improving the design, the solution of which allows to improve the environmental properties of the automobile by reducing vibration and noise.

Perturbations from the action of overturning (reactive) torque are substantially different from the action of inertial forces and moments. Its common quantitative evaluation in existing methods of analysis is missing, which complicates a general analysis of the balance.

The authors proposed to use as the same for all sources of imbalance the measures of perturbation value the maximum for the period of the pulse value, developed a software system that allow to perform such an assessment of unbalance for three-cylinder reciprocating engine type L3 with the specified weight and size characteristics and modes of operation.

The mechanism is proposed to partially balance the reactive torque of the engine, the optimal parameters for the field of specified modes of operation was found. Using the developed complex the analytical quantification of unbalance from the action of overturning moment of three-cylinder engine with typical mass-dimensional parameters as when balancing with proposed method and without it was made. For a typical scheme of moment partial balancing of forces of inertia of the first order in considered engine the assessments of disturbances were made and their effect on different modes was studied.

It was found out that in the engine of L3 type unbalance from the action of reactive torque at low and medium frequencies of rotation makes a major contribution to vibroactivity of engine surpassing in values of the impulse contribution from the residual unbalance from the moment of inertia of the first order inherent to typical designs. The mechanism allows to decrease this imbalance several times.

Keywords: *three-cylinder engine, engine balancing, overturning torque, engine torque, balancing mechanism, optimization of trim, quantitative assessment of balance, momentum perturbations.*